

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2017.60807

黄欢, 张朝晖. 岩溶型铝土矿尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物多样性特征[J]. 植物科学学报, 2017, 35(6): 807-814.

Huang H, Zhang ZH. Diversity characteristics of bryophytes in different succession stages on the karst bauxite tailing piles [J]. *Plant Science Journal*, 2017, 35(6): 807–814

岩溶型铝土矿尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物多样性特征

黄欢, 张朝晖 *

(贵州师范大学山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001)

摘要:按空间代替时间序列的方法,对贵州省修文县小山坝岩溶型铝土矿区尾矿堆5个不同自然演替阶段苔藓植物多样性进行了研究。结果显示:(1)苔藓植物共有11科18属31种,其中藓类9科16属29种,苔类2科2属2种。在演替过程中,苔藓植物生活型单一,仅矮丛集型(占67.7%)和交织型(占32.3%),矮丛集型占优势地位。苔藓植物物种组成简单,纯群落较多,混合群落随演替阶段逐渐增多。(2)不同自然演替阶段苔藓植物群落Shannon-Wiener指数、Pielou均匀度指数和丰富度指数有所不同,裸岩阶段最低(0.196、0.283和-1.930),草灌丛阶段最高(3.470、1.281和2.342),乔灌木阶段逐渐下降(2.128、0.887和1.267)。苔藓植物种的替代速率与相似性变化趋势相反。小山坝岩溶型铝土矿区尾矿堆苔藓植物多样性在5个不同自然演替阶段呈先上升后下降的变化规律,多样性水平总体呈上升趋势,研究结果可为岩溶型铝土矿区生态恢复和生物多样性保护提供基础资料。

关键词: 苔藓植物; 多样性; 自然演替; 尾矿堆; 岩溶型铝土矿

中图分类号: Q948

文献标识码·A

文章编号: 2095-0837(2017)06-0807-08

Diversity characteristics of bryophytes in different succession stages on the karst bauxite tailing piles

Huang Huan, Zhang Zhao-Hui *

(Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Based on spatial replacing temporal series, we studied the diversity of the bryophytes in five different natural succession stages in the karst bauxite tailing piles of the Xiaoshanba Bauxite Deposit, Xiuwen County, Guizhou Province. Results showed that: (1) There were 31 taxa of bryophytes belonging to 18 genera and 11 families, of which there were 29 taxa of mosses belonging to 16 genera and 9 families, and 2 taxa of liverworts belonging to 2 genera and 2 families. In the succession stages, the bryophyte life forms were simple, with short turfs the dominant life form, accounting for 67.7%, and the wefts accounting for 32.3%. The bryophyte species composition was monotonous, with many single-species communities, though mixed-species communities gradually increased along the succession stages. (2) The bryophyte indices were different in different natural succession stages, with the Shannon-Wiener Index, Pielou Index, and Abundance Index all lowest (0.196, 0.283, and -1.930, respectively) in the bare rock stage, and the highest (3.470, 1.281, and 2.342, respectively) in the herbosa-boscage stage. The diversity indices then gradually declined (2.128, 0.88,

收稿日期: 2017-05-04, 退修日期: 2017-06-22。

基金项目：国家自然科学基金项目（31360043）。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (31360043).

作者简介：黄欢(1991-)，女，硕士研究生，研究方向为工业与城市生态学(E-mail: 1050908409@qq.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence. E-mail: academiclife@126.com)。

and 1.267, respectively) in the arbor-shrub stage. The Cody Index and Sørensen Similarity Index showed the opposite tendencies. The faster the replacement rate of species, the smaller was the similarity in the two adjacent succession stages. In the five different natural succession stages, the change in bryophyte diversity demonstrated a regular tendency, whereby the level of diversity increased at first, then decreased gradually on the karst bauxite tailing piles. Generally, the level of bryophyte diversity improved. These findings provide basic information for the ecological restoration and biodiversity conservation of the karst bauxite mining area.

Key words: Bryophytes; Diversity; Natural succession; Tailing piles; Karst bauxite

修文县小山坝铝土矿是贵州最重要的岩溶型铝土矿产资源之一, 属于古风化堆积型一水硬铝石, 其地貌为岩溶峰丛山地和岩溶洼地。与贵州其他岩溶型铝土矿采矿区相比, 小山坝所处采矿区矿层厚度变化颇大, 地质条件和环境地质条件相对较差。矿床水文地质类型为岩溶水充水矿床, 更容易造成地面塌陷、崩塌、水土污染、滑坡和坡面泥石流等地质灾害^[1]。矿山主要为露天开采, 易破坏地表植物和土壤结构, 废石、废渣易形成尾矿堆积, 不仅占用土地、破坏景观, 且其中所含的金属和伴生金属元素在外界因素影响下活动性增强, 易迁移进入地下水、地表水、土壤及生物体中, 对周围生态环境造成严重破坏^[2, 3]。长此以往, 铝土矿区重金属污染严重, 植被急剧减少, 生物多样性丧失, 生态系统崩溃。苔藓植物因其特殊生理适应机制, 是自然演替过程中常见的先锋植物^[4], 能在极端环境下生存繁衍, 改善生长基质, 促进植被演替, 在退化生态系统植被恢复中有积极作用^[5]。群落进发展演替是生态系统演变的自然选择^[6], 研究自然演替过程中苔藓植物多样性, 对生态恢复研究和生物多样性保护具有一定的指导意义。目前, 对山地、森林生态系统和树附生苔藓植物多样性等研究较多^[7-10]; 关于矿区生态系统苔藓植物多样性的研究有汞金矿^[3]、铝土矿等^[2, 11], 且多偏重研究苔藓植物对矿区重金属污染监测和分布; 有关岩溶型铝土矿苔藓植物多样性报道较少。因此, 本文以修文县小山坝岩溶型铝土矿区废弃尾矿堆为研究背景, 探讨在自然演替阶段矿区尾矿堆苔藓植物多样性特征, 以期为岩溶型铝土矿区生态恢复和生物多样性研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

小山坝铝土矿区位于贵州省修文县

($26^{\circ}47'11.44''N$, $106^{\circ}36'55.69''E$), 地处“黔中隆起”南缘的古岩溶盆地黔中铝土矿成矿区东侧, 是典型的岩溶型地貌; 具温暖湿润的北亚热季风气候, 年均温 $\geq 14^{\circ}C$, 无霜期265 d; 季风交替明显, 气候温和, 降水丰富, 水热同期。地带性植被为中亚热带湿润常绿阔叶林, 其中岩溶地带主要植被为灌丛和草丛^[12]。

在矿区废石废渣堆积区, 因堆积时间不同, 尾矿堆被不同类型植被覆盖。矿区重金属污染严重, 环境恶劣, 维管束植物生存比较艰难, 适应性较强的苔藓植物在尾矿堆上生长良好。不同植被类型覆盖的尾矿堆上形成了连续完整的旱生演替, 按植被类型不同, 可分为裸岩阶段、苔藓植物群落阶段、草本植物阶段、草灌丛阶段和乔灌木阶段5个不同自然演替阶段, 为开展尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物多样性研究提供了有利环境条件。样地内主要维管束植物有: 蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.)、马兰(*Kalimeris indica* (L.) Sch.-Bip.)、小窃衣(*Torilis japonica* (Houtt.) DC.)、何首乌(*Fallopia multiflora* (Thunb.) Harald.)、马桑(*Coriaria nepalensis* Wall.)、青蒿(*Artemisia carvifolia* Buch.-Ham. ex Roxb.)、老鹳草(*Geranium wilfordii* Maxim.)、野蔷薇(*Rosa multiflora* Thunb.)、火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li)、小叶杨(*Populus simonii* Carr.)等。

1.2 采样及物种鉴定

采样: 按空间代替时间序列的方法, 在矿区随机选取5个不同植被类型的尾矿堆作为5个自然演替阶段。依据群落最小面积法原则, 根据实际情况, 每个阶段设置6个样方, 采用 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 金属样方框对苔藓植物取样, 记录盖度。植物群落按优势种原则进行命名^[13], 不同演替阶段尾矿堆植被见表1。

表 1 不同演替阶段尾矿堆植被概况

Table 1 General vegetation situation in the different succession stages on the tailing piles

序号 Number	演替阶段 Succession stage	主要植物 Main plants	优势种 Dominant species
1	裸岩阶段	少量苔藓	硬叶小金发藓 <i>Polygonatum neesii</i> (C. Muell.) Dozy
2	苔藓植物群落阶段	苔藓植物	亚灰白青藓 <i>Brachythecium subalbicans</i> Broth.
3	草本植物阶段	菊科 Compositae、伞形科 Poaceae、酢浆草科 Oxalidaceae 等植物	青蒿 <i>Artemisia carvifolia</i> Buch.-Ham. ex Roxb.
4	草灌丛阶段	蔷薇科 Rosaceae、菊科 Compositae、牻牛儿苗科 Geraniaceae、马桑科 Coriariaceae、酢浆草科 Oxalidaceae 等植物	野蔷薇 <i>Rosa multiflora</i> Thunb.
5	乔灌木阶段	杨柳科 Salicaceae、蔷薇科 Rosaceae、蓼科 Polygonaceae、马桑科 Coriariaceae、菊科 Compositae、酢浆草科 Oxalidaceae 等植物	小叶杨 <i>Populus simonii</i> Carr.

物种鉴定: 采用 HWG-1 型双筒解剖镜和 Nr. M251564 型光学显微镜对样本进行形态学观察, 参考《中国苔藓志》^[14-21] 及相关文献^[22] 对苔藓植物进行物种鉴定。

2 研究方法

利用多样性测度方法, 选取物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数对苔藓植物 α 多样性进行测定, 用 Sørensen 相似性指数和 Cody 指数对 β 多样性进行测定^[11, 23-25]。采用 Excel 2010 和 R 言语对数据进行分析处理并作图。相关计算公式如下:

$$\text{丰富度指数: } S_j = \sum_{i=1}^n \frac{x_{ij} - \bar{x}_{ij}}{\bar{x}_{ij}} \quad (1)$$

式中, x_{ij} 为 k 个地区中第 i 个地区 n 个分类单元中的第 j 个分类单元数据; \bar{x}_{ij} 为 k 个地区中 n 个分类单元中第 j 个分类单元的数据平均值; n 为分类阶层数。

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

式中, $P_i = N_i / N$, N_i 为第 i 种的盖度, N 为 S 个种的盖度之和, S 为每个样点所有苔藓物种数。

Sørensen 相似性指数:

$$S_c = 2c / (a + b) \quad (4)$$

Cody 指数:

$$\beta_c = [g(H) + l(H)] / 2 = (a + b - 2c) / 2 \quad (5)$$

式中, a 、 b 为两个演替阶段苔藓植物物种数,

c 为两阶段苔藓植物共有种数。

3 结果与分析

3.1 不同自然演替阶段苔藓植物物种组成

小山坝岩溶型铝土矿区尾矿堆苔藓植物共计有 11 科 18 属 31 种(含变种), 其中, 薜类 9 科 16 属 29 种, 苔类 2 科 2 属 2 种(表 2)。苔藓植物物种在各自然演替阶段的分布如图 1 所示, 随演替发展, 苔藓植物物种增加, 物种数在裸岩阶段最少, 草灌丛阶段最多, 乔灌木阶段逐渐减少。

尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物生活型与群落结构各不相同。自然演替中, 苔藓植物生活型以矮丛集型为主(图 2)。裸岩阶段和草本植物阶段苔藓植物全为矮丛集型; 在草灌丛阶段和乔灌木阶段, 交织型分别占 50% 和 20%, 矮丛集型分别占 50% 和 80%, 矮丛集型仍然占优势地位。

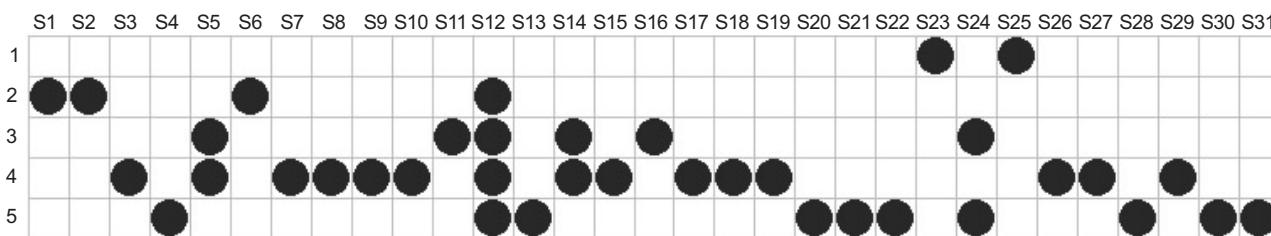
尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物物种组成简单, 苔藓植物群落阶段以纯群落最多。随演替进行, 混合群落增多, 并以草本植物阶段和乔灌木阶段最多(图 3)。

3.2 不同自然演替阶段苔藓植物群落多样性分析

裸岩阶段, 只有极少量苔藓植物覆盖尾矿堆。此阶段设置的 6 个小样方中, 仅 2 个小样方发现有苔藓植物, 盖度分别为 10% 和 1%, 苔藓植物多样性水平最低, 苔藓群落结构极其简单, 仅硬叶小金发藓(*Polygonatum neesii* (C. Muell.) Dozy) 纯群落及零星分布的卷叶毛口藓(*Trichostomum involutum* Broth.) Fleisch.), 两者均为耐旱矮丛集型苔藓植物。

表2 小山坝尾矿堆苔藓植物物种统计
Table 2 Statistics of bryophyte species in Xiaoshanba tailing piles

物种编号 Species number	物种 Species	物种编号 Species number	物种 Species
S1	黄牛毛藓 <i>Ditrichum pallidum</i> (Hedw.) Hamp.	S17	狭叶小羽藓 <i>Haplocladium angustifolium</i> (Hampe et C. Muell.) Broth.
S2	卷叶牛毛藓 <i>Ditrichum difficile</i> (Duby) Fleisch.	S18	灰羽藓 <i>Thuidium pristocalyx</i> (C. Muell.) Jaeg.
S3	细牛毛藓 <i>Ditrichum flexicaule</i> (Schwaeger.) Hamp.	S19	细湿藓稀齿变种 <i>Campylium hispidulum</i> var. <i>sommerfeltii</i> (Myr.) Lindb.
S4	短齿牛毛藓 <i>Ditrichum brevidens</i> Nog.	S20	长柄麻锦藓 <i>Taxithelium alare</i> Broth.
S5	疣蒴角齿藓 <i>Ceratodon stenocarpus</i> B. S. G.	S21	疏叶叶苔 <i>Jungermannia laxifolia</i> Gao
S6	亚灰白青藓 <i>Brachythecium subalbicans</i> Broth.	S22	平叶苔 <i>Pedinophyllum truncatum</i> (Steph.) Inoue
S7	扁枝青藓 <i>Brachythecium planiusculum</i> C. Muell.	S23	硬叶小金发藓 <i>Pogonatum neesii</i> (C. Muell.) Dozy
S8	毛尖青藓 <i>Brachythecium piligerum</i> Card.	S24	舌叶毛口藓 <i>Trichostomum barbuloides</i> (Broth.) Chen
S9	绿枝青藓 <i>Brachythecium viridefactum</i> C. Muell.	S25	卷叶毛口藓 <i>Trichostomum involutum</i> Broth.
S10	赤根青藓 <i>Brachythecium erythrorrhizon</i> B. S. G.	S26	小石藓原变种 <i>Weisia controversa</i> Hedw. var. <i>controversa</i>
S11	银藓 <i>Anomobryum filiforme</i> (Dicks.) Solms	S27	拟阔叶小石藓 <i>Weisia platyphyloides</i> Card.
S12	芽胞银藓 <i>Anomobryum gemmigerum</i> Broth.	S28	皱叶小石藓 <i>Weisia crispa</i> (Hedw.) Mitt.
S13	林地丝瓜藓 <i>Pohlia drummondii</i> (C. Muell.) Andr.	S29	小反纽藓 <i>Timmiella diminuta</i> (C. Muell.) Chen
S14	南亚小曲尾藓 <i>Dicranella coarctata</i> (C. Muell.) Boesch et Lac.	S30	卷叶石灰藓 <i>Hydrogonium amplexifolium</i> (Mitt.) Chen
S15	小曲尾藓 <i>Dicranella grevilleana</i> (Brid.) Schimp.	S31	暗色石灰藓 <i>Hydrogonium sordidum</i> (Besch.) Chen
S16	细叶卷毛藓 <i>Dicranoweisia cinnata</i> (Hedw.) Lindb.		



S1 ~ S31 分别代表不同的苔藓植物物种(见表2)。1 ~ 5 分别代表裸岩阶段、苔藓植物群落阶段、草本植物阶段、草灌丛阶段、乔灌木阶段。下同。

S1, S2 … and S31 represent different bryophyte species (See table 2). 1, 2, 3, 4, and 5 represent the bare rock, bryophyte community, herb, herbosa-boscage, and arbor-shrub stages on the coordinate axis. Same below.

图1 尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物分布图

Fig. 1 Distribution of bryophytes in different natural succession stages on the tailing piles

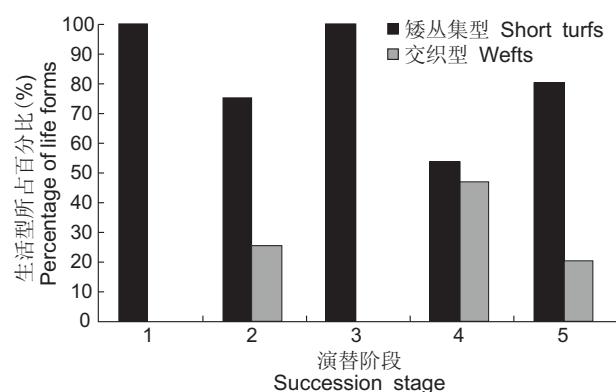


图2 尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物生活型

Fig. 2 Bryophyte life forms in different natural succession stages on the tailing piles

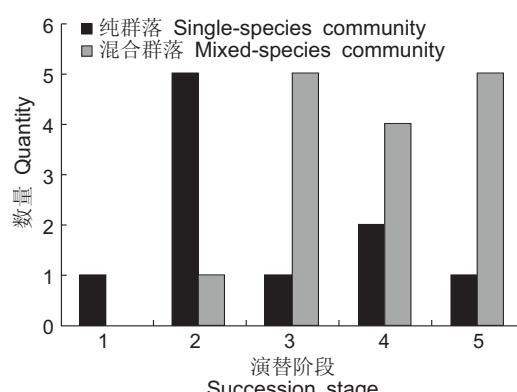


图3 尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物群落结构

Fig. 3 Structure of the bryophyte communities in different natural succession stages on the tailing piles

苔藓植物群落阶段, 尾矿堆无维管束植物覆盖, 苔藓植物群落呈小块垫状生长。苔藓植物群落有: 黄牛毛藓(*Ditrichum pallidum* (Hedw.) Hamp.)群落、卷叶牛毛藓(*Ditrichum difficile* (Duby) Fleisch.)群落、亚灰白青藓(*Brachythecium subalbicans* Broth.)群落、卷叶牛毛藓-芽胞银藓(*Ditrichum difficile* (Duby) Fleisch.-*Anomobryum gemmigerum* Broth.)群落。该阶段苔藓植物生活型多为矮丛集型, 优势种亚灰白青藓是唯一交织型, 此时环境干燥, 苔藓植物多为耐旱型(如牛毛藓科Ditrichaceae)。亚灰白青藓极可能来自尾矿堆积区附近山林, 而非尾矿堆积后自然演替中定居的物种。

草本植物阶段是尾矿堆自然演替的第三阶段, 相比前两个阶段生境条件较好。尾矿堆植被主要为草本植物, 有青蒿、马兰、小窃衣、蒲公英、马桑等, 以青蒿为优势种。苔藓植物群落有: 南亚小曲尾藓(*Dicranella coarctata* (C. Muell.) Boesch et Lac.)群落、舌叶毛口藓-银藓(*Trichostomum barbuloides* (Broth.) Chen-*Anomobryum filiforme* (Dicks.) Solms)群落、南亚小曲尾藓-细叶卷毛藓(*Dicranella coarctata* (C. Muell.) Boesch et Lac.-*Dicranoweisia cirrata* (Hedw.) Lindb.)群落、芽胞银藓-疣蒴角齿藓(*Anomobryum gemmigerum* Broth.-*Ceratodon stenocarpus* B. S. G.)群落、南亚小曲尾藓-芽胞银藓群落。此阶段苔藓植物混合群落较多, 优势种南亚小曲尾藓出现较多, 群落物种组成简单, 生活型仅为矮丛集型。

草灌丛阶段, 苔藓植物群落发展良好, 物种最丰富。尾矿堆植被复杂多样, 植被以小灌木野蔷薇为优势种, 另有马桑科(Coriariaceae)、菊科(Compositae)、牻牛儿苗科(Geraniaceae)、酢浆草科(Oxalidaceae)、豆科(Leguminosae)等植物。苔藓植物群落有: 南亚小曲尾藓群落、小曲尾藓-疣蒴角齿藓(*Dicranella grevilleana* (Brid.) Schimp.-*Ceratodon stenocarpus* B. S. G.)群落、细牛毛藓-小反纽藓(*Ditrichum flexicaule* (Schwaeger.) Hamp.-*Timmiella diminuta* (C. Muell.) Chen)群落、狭叶小羽藓(*Haplocladium angustifolium* (Hampe et C. Muell.) Broth.)群落、灰羽藓-毛尖青藓(*Thuidium pristocalyx* (C.

Muell.) Jaeg. -*Brachythecium piligerum* Card.)群落、赤根青藓-细湿藓稀齿变种(*Brachythecium erythrorrhizon* B. S. G.-*Campylium hispidulum* var. *sommerfeltii* (Myr.) Lindb.)群落。狭叶小羽藓为苔藓植物群落优势种, 其它还有芽胞银藓、小石藓原变种(*Weisia controversa* Hedw. var. *controversa*)、扁枝青藓(*Brachythecium planiusculum* C. Muell.)、绿枝青藓(*Brachythecium viridefactum* C. Muell.)、拟阔叶小石藓(*Weisia platyphyloides* Card.)等。该阶段苔藓植物群落结构复杂, 发展稳定, 生活型有矮丛集型和交织型两种, 以矮丛集型为主。

乔灌木阶段, 即尾矿堆自然演替的最后阶段, 植被优势种为乔木小叶杨, 其次是野蔷薇、火棘等小灌木。苔藓植物群落有: 长柄麻锦藓-卷叶石灰藓(*Taxithelium alare* Broth.-*Hydrogonium amplexifolium* (Mitt.) Chen)群落、平叶苔-疏叶叶苔(*Pedinophyllum truncatum* (Steph.) Inoue-*Jungermannia laxifolia* Gao)群落、皱叶小石藓-芽胞银藓(*Weisia crispa* (Hedw.) Mitt.-*Anomobryum gemmigerum* Broth.)群落、芽胞银藓-短齿牛毛藓(*Anomobryum gemmigerum* Broth.-*Ditrichum brevidens* Nog.)群落、长柄麻锦藓-林地丝瓜藓(*Taxithelium alare* Broth.-*Pohlia drummondii* (C. Muell.) Andr.)群落、长柄麻锦藓群落。长柄麻锦藓为苔藓植物群落优势种, 其它还有舌叶毛口藓(*Trichostomum barbuloides* (Broth.) Chen)、暗色石灰藓(*Hydrogonium sordidum* (Besch.) Chen)、短齿牛毛藓(*Ditrichum brevidens* Nog.)等。该阶段植被类型为乔灌木, 尾矿堆生境阴湿郁闭, 有苔类定居。苔藓植物生活型有矮丛集型和交织型两种, 仍以矮丛集型为主。

3.3 不同自然演替阶段苔藓植物多样性变化

3.3.1 α 多样性指数变化

尾矿堆自然演替阶段苔藓植物群落 α 多样性测度可见(图4), 苔藓植物群落Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数变化趋势相同, 分别在0.196~2.128和0.283~0.887范围内呈“M”型变化, 即先逐渐上升后下降, 然后再继续上升后下降, 均在裸岩阶段出现最小值(0.196和0.283), 在草灌丛阶段出现最大值(3.470和1.281)。

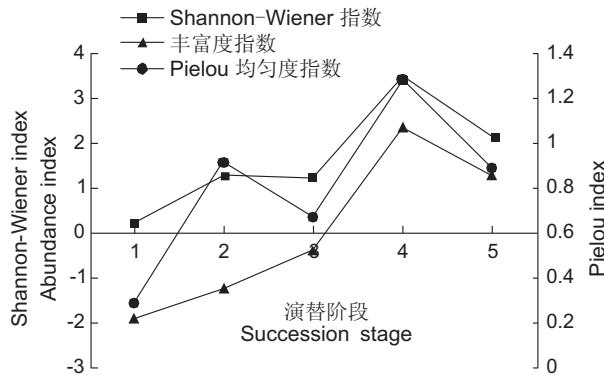


图4 尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物 α 多样性指数变化

Fig. 4 Changes in α -diversity indices of bryophytes in different natural succession stages on the tailing piles

丰富度指数在 $-1.930 \sim 1.267$ 范围内变化, 从裸岩阶段最小值 (-1.930) 逐渐上升至草灌木阶段最大值 (2.342), 乔灌木阶段逐渐下降 (1.267), 其变化趋势与 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数不同, 但指数极值发生阶段一致。

3.3.2 β 多样性指数变化

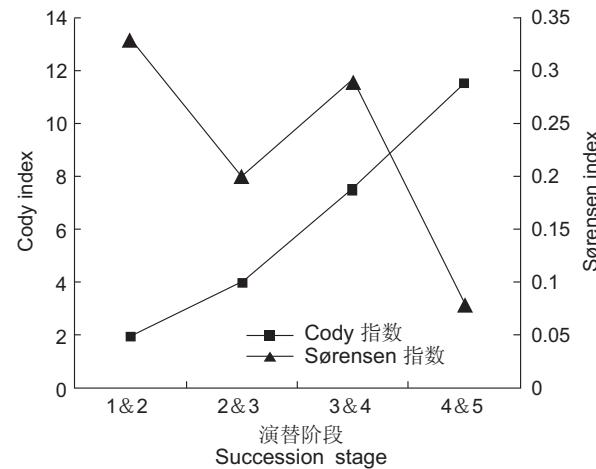
尾矿堆自然演替阶段苔藓植物群落 β 多样性测度显示, Cody 指数和 Sørensen 相似性指数变化明显(表3)。Cody 指数在 $2.0 \sim 11.5$ 范围内变化, 在裸岩阶段和苔藓植物群落阶段, 苔藓植物物种替代速率最小 (2.0), 草灌丛阶段和乔灌木阶段, 物种替代速率最大 (11.5)。Sørensen 相似性指数在 $0 \sim 0.33$ 范围内变化, 裸岩阶段和苔藓植物群落阶段相似性最大 (0.33), 与其他演替阶段相似性为 0 , 其次草本植物阶段和草灌木阶段为

表3 尾矿堆不同自然演替阶段苔藓植物 β 多样性指数变化

Table 3 Changes in β -diversity indices of bryophytes in different natural succession stages on the tailing piles

演替阶段 Succession stage	1	2	3	4	5
Cody 指数					
1	-	2.0	4.0	8.5	6.0
2			4.0	8.5	6.0
3				7.5	6.0
4					11.5
5					-
Sørensen 相似性指数					
1	-	0.33	0	0	0
2			0.20	0.11	0.14
3				0.29	0.25
4					0.08
5					-

0.29。从图5可见, 相邻演替阶段, 苔藓植物群落相似性最大时物种替代速率最小, 相似性最小时替代速率最大, 两者总体变化趋势相反。



1 & 2, 2 & 3, 3 & 4, 4 & 5 分别表示相邻自然演替阶段。

1 & 2, 2 & 3, 3 & 4, and 4 & 5 represent the adjacent natural succession stages.

图5 相邻自然演替阶段苔藓植物 β 多样性指数变化

Fig. 5 Changes in β -diversity indices of bryophytes in adjacent natural succession stages

4 讨论

4.1 不同自然演替阶段尾矿堆苔藓植物群落组成及生活型

小山坝岩溶型铝土矿尾矿堆苔藓植物从裸岩阶段至乔灌木阶段, 优势种依次为: 硬叶小金发藓、亚灰白青藓、南亚小曲尾藓、狭叶小羽藓、长柄麻锦藓。演替早期尾矿堆植被稀少, 环境恶劣, 纯群落较多, 在裸岩阶段仅有硬叶小金发藓纯群落。演替后期植被丰富, 生境条件较好, 苔藓植物丰富, 群落组成复杂多样, 混合群落逐渐增多。

不同生活型体现了植物对环境的适应性差异, 反之, 植物对生境变化的适应性调整体现在其生活型的转变^[26]。从裸岩阶段至乔灌木阶段, 尾矿堆苔藓植物生活型以矮丛集型为主, 随着植被类型的变化, 样地生境改变, 演替后期交织型苔藓植物相对增多。苔藓植物矮丛集生活型是对干燥、贫瘠等生境的响应^[27]。研究表明^[28], 在喀斯特地貌的贵州东南汞金矿带废石废渣区, 相比其他生活型矮丛集型苔藓植物更能适应强光、植被稀少、重金属污染严重的生境。

4.2 不同自然演替阶段尾矿堆苔藓植物多样性特征

尾矿堆不同自然演替阶段, 苔藓植物多样

性总体呈先上升后下降的变化规律。苔藓植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数在裸岩阶段最小, 在草灌丛阶段值最大, 乔灌木阶段逐渐减小。由此可知, 苔藓植物多样性水平在裸岩阶段最低、草灌丛阶段最高、乔灌木阶段逐渐下降。随着演替进行, 相邻两个演替阶段苔藓物种的替代速率越来越大, 相似性越来越低, 两者总体变化趋势相反。群落间演替阶段相隔越远, 则苔藓植物相同物种越少, 群落间物种相似性越低。本研究与喀斯特石漠生态系统自然演替中苔藓植物群落的变化趋势^[29]相同。

小山坝岩溶型铝土矿尾矿堆自然演替中, 环境条件较恶劣, 光照强、干燥、土壤稀薄。尾矿堆中大量重金属元素随雨水冲刷、空气氧化等物化作用进入矿区土壤和水体中, 短时间内难以分解^[30]。有研究表明, 在遵义后槽岩溶型铝土矿废石堆积区, 苔藓植物生长受土壤中金属元素 Fe、Cu 和 Zn 的影响, 因尾矿堆受雨水冲蚀淋溶和风蚀作用, 导致样地金属含量高^[31]。小山坝铝土矿区同为贵州岩溶型铝土矿, 苔藓植物生长和群落发展极有可能受其基质中金属元素影响。在演替早期, 尾矿堆上定居的苔藓植物多为耐受性较高的物种, 如裸岩阶段的硬叶小金发藓极耐旱; 苔藓植物群落阶段的芽胞银藓, 有众多无性芽胞, 孢子生殖的繁殖方式使其更能适应恶劣的生活环境。

随演替阶段的进行, 尾矿堆苔藓植物丰富度增加, 从苔藓植物群落阶段开始, 苔藓植物呈小型垫状生长。有研究表明, 裸露的石灰岩道路地面苔藓密集生长, 呈垫状时可以储存更多水分, 在促进群落发展的同时也改善基质, 为维管束植物定居提供了有利条件^[32]。与此同时, 植被类型的变化也影响尾矿堆上温湿度、光照等生境条件。草灌丛阶段苔藓植物多样性水平最高, 群落发展较稳定, 出现苔藓植物固定常见组合, 即羽藓科(Thuidiaceae)与青藓科(Brachytheciaceae)群落。在演替后期, 植被类型由草本植物转变为小叶杨和火棘等乔灌木, 此时生境内林冠层的郁闭度等是影响苔藓植物多样性的主要因素, 种间生态位重叠高, 苔藓植物多样性水平反而下降^[33, 34]。

参考文献:

[1] 尹努寻, 朱学书, 杨秀丽. 贵州铝土矿开采技术条件及其对

- 矿山地质环境的制约[J]. 贵州地质, 2012, 29(3): 210-213.
- Yin NX, Zhu XS, Yang XL. Mining technical condition and its restriction to the mine geological environment of bauxite deposit in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 2012, 29(3): 210-213.
- [2] 龙朝波, 张朝晖. 平果岩溶型铝土矿区苔藓多样性及对金属污染的监测指示[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 358-363.
- Long CB, Zhang ZH. Diversity of the bryophytes and their function in monitoring metal contamination in the karst bauxite area in Guangxi[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(5): 358-363.
- [3] 潘莎, 张朝晖. 废弃汞矿山苔藓植物群落生态研究[J]. 植物研究, 2011, 31(2): 241-248.
- Pan S, Zhang ZH. Bryophyte communities from abandoned mercury mine in eastern Guizhou Province[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2011, 31(2): 241-248.
- [4] 吴玉环, 程国栋, 高谦. 苔藓植物的生态功能及在植被恢复与重建中的作用[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 215-220.
- Wu YH, Chen GD, Gao Q. Bryophyte's ecology functions and its significances in revegetation[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(3): 215-220.
- [5] Veste M. The importance of biological soil crusts for rehabilitation of degraded arid and semi-arid ecosystems[J]. *Sci Soil Water Cons*, 2005, 3(4): 42-47.
- [6] 樊燕, 黎祖尧, 范承芳, 范方礼, 施建敏, 杨清培, 杨光耀, 柯国庆. 石灰岩山地淡竹林演替序列的群落物种多样性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3238-3244.
- Fan Y, Li ZY, Fan CF, Fan FL, Shi JM, Yang QP, Yang GY, Ke GQ. Species diversity along the succession series from bamboo forest to broad-leaved forest in a limestone mountain[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3238-3244.
- [7] Mandle NA, Kessler M, Gradstein SR. Effects of environmental heterogeneity on species diversity and composition of terrestrial bryophyte assemblages in tropical montane forests of southern Ecuador[J]. *Plant Ecol Divers*, 2009, 2(3): 313-321.
- [8] 侯荣, 张华, 弋灵均, 刘剑刚, 吕蕊, 王颖. 辽东山地古石河冰缘地貌森林生态系统苔藓物种多样性研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(6): 857-872.
- Hou R, Zhang H, Yi LJ, Liu JG, Lü R, Wang Y. Study on epiphytic bryophytes species diversity of forest ecosystems in the ancient rock stream periglacial landform of the liaoning eastern mountains [J]. *Plant Science Journal*, 2016, 34(6): 857-872.
- [9] Romanski J, Pharo EJ. Epiphytic bryophytes and habitat variation in montane rainforest, Peru [J]. *Bryologist*, 2011, 114(4): 720-731.

- [10] 田晔林, 李俊清, 石爱平, 于建军, 王文和. 北京百花山自然保护区树附生苔藓植物物种多样性[J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 838-844.
- Tian YL, Li JQ, Shi AG, Yu JJ, Wang WH. Species diversity of epiphytic bryophytes in Baihua mountain national nature reserve, Beijing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(4): 838-844.
- [11] 籍烨, 张朝晖. 林歹二矿岩溶型铝土矿区藓类植物多样性及其生态分布特征研究[J]. 中国岩溶, 2015, 34(6): 599-606.
- Ji Y, Zhang ZH. Biodiversity of bryophytes and their characteristics of ecological distribution in the second Lindai karst bauxite area [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(6): 599-606.
- [12] 彭丽芬, 李新贵. 贵阳市修文县森林资源现状分析及建议[J]. 四川勘察计, 2010(3): 16-19.
- Peng LF, Li GX. Analysis on the actuality of forest resource in Xiuwen County [J]. *Sichuan Forestry Exploration and Design*, 2010(3): 16-19.
- [13] 张朝晖, 陈家宽, 艾伦·培特客斯. 英格兰喀斯特瀑布苔藓植物水生群落生态研究[J]. 水生生物学报, 2008, 32(1): 134-140.
- Zhang ZH, Chen JK, Pentecost A. Aquatic communities of bryophytes associated with karst waterfalls in England [J]. *Acta Hydro Biologica Sinica*, 2008, 32(1): 134-140.
- [14] 高谦. 中国苔藓志: 第1卷[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-368.
- [15] 高谦. 中国苔藓志: 第2卷[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-293.
- [16] 黎兴江. 中国苔藓志: 第4卷[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-263.
- [17] 吴鹏程. 中国苔藓志: 第6卷[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-290.
- [18] 胡人亮, 王幼芳. 中国苔藓志: 第7卷[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-288.
- [19] 吴鹏程, 贾渝. 中国苔藓志: 第8卷[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-428.
- [20] 高谦, 吴玉环. 中国苔藓志: 第9卷[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-323.
- [21] 高谦, 吴玉环. 中国苔藓志: 第10卷[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-464.
- [22] Koch LF. The journal of the hattori botanical laboratory [J]. *Bryologist*, 1955, 58(2): 155-157.
- [23] Peet RK. The measurement of species diversity [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1974, 5(1): 285-307.
- [24] Magurran AE. *Ecological Diversity and Its Measurement* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988.
- [25] Whittaker RH. Evolution and measurement of species diversity [J]. *Taxon*, 1972, 21(2/3): 213-251.
- [26] Yan ZC. Ecotype and life-form [J]. *Bull Biol*, 2001, 36(5): 4-5.
- [27] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-357.
- [28] 刘荣相, 张朝晖. 贵州东南部喀斯特汞金矿带苔藓植物及其重金属富集特征[J]. 中国岩溶, 2010, 29(1): 41-47.
- Liu RX, Zhang ZH. Bryophytes and its heavy metal accumulation in mercury-gold ore belt in the karst area of south east Guizhou [J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(1): 41-47.
- [29] 籍烨, 张朝晖. 喀斯特石漠生态系统不同自然演替阶段中苔藓植物多样性特征分析[J]. 植物科学学报, 2014, 32(6): 577-585.
- Ji Y, Zhang ZH. Analysis of bryophytes diversity features in various successional stages of a karst rocky desertification ecosystem [J]. *Plant Science Journal*, 2014, 32(6): 577-585.
- [30] Passariello B, Giuliano V, Quaresima S, Barbaro M, Caroli S, Forte G, Carelli G, Iavicoli I. Evaluation of the environmental contamination at an abandoned mining site [J]. *Microchem J*, 2002, 73(1-2): 245-250.
- [31] Wang SQ, Zhang ZH, Wang ZH. Bryophyte communities as biomonitor of environmental factors in the Goujiang karst bauxite, southwestern China [J]. *Sci Total Environ*, 2015, 538: 270-278.
- [32] Sand-Jensen K, Kathrine JH, Madsen-Osterbye M, Kragh T. Positive interactions between moss cushions and vascular plant cover improve water economy on Öland's alvar, Sweden [J]. *Botany*, 2015, 93(3): 141-150.
- [33] Rambo TR, Muir PS. Forest floor bryophytes of *Pseudotsuga menziesii*-*Tsuga heterophylla* stands in Oregon: influences of substrate and overstory [J]. *Bryologist*, 1998, 101(1): 116-130.
- [34] 姜炎彬, 邵小明. 苔藓植物分布及其物种多样性的研究评述[J]. 武汉植物学研究, 2010, 28(3): 385-390.
- Jiang YB, Shao XM. Research review on the distribution and diversity of bryophytes [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2010, 28(3): 385-390.